

落球探査試験における締固め土の応力伝播特性について (その1:実験的検討)

締固め 変形係数 ブジネスク解

愛知工業大学 国際会員
鹿島建設(株) 正会員
(株)アイコ 正会員
(株)セントラル技研 正会員中村吉男
○小澤 一喜・藤崎 勝利
小島 淳一
池尻 健

1. はじめに

盛土構造物の品質管理においては、含水比と乾燥密度に着目した締固度に基づく管理方法が最も一般的な方法である。これに対して、路床、橋台、カルバートボックスの裏込め等のように力学定数が直接的に要求される構造物については平板載荷試験や現場 CBR 試験などの支持力試験を行って管理されることが多く、試験の準備と測定に時間を要し測定頻度においても限界があり、代替あるいは補間的な手段として敏速で機動性の高い試験の適用が求められている。また、廃棄物の埋め立て地盤や災害廃棄物由来の分別土砂を用いた盛土の材料物性については十分な知見が得られておらず、これらの盛土工事においては路床などの管理と同様な観点から強度や変形特性を検査する手法による管理が求められる。そこで、本研究では、その管理手法の一つとして利用されている落球探査試験法の工学的意義を究明することを目的として、落球探査試験の特徴である衝撃荷重の応力伝播特性を評価するための室内実験を行った。具体的には、土層厚さと側方の拘束効果に着目し変形係数(地盤変形を線形弾性論で評価する際のヤング率に等しい、次元 $ML^{-1}T^{-2}$) の変化を把握し、半無限地盤として適用しうる土層規模と探査深度について考察した。

2. 落球探査試験の概要

落球探査試験は、加速度センサーを内蔵した半球状の金属製重錘(直径 20cm、重さ 19.1kg、)を用いるサウンディング手法である。機器構成は図-1 に示すとおりであり、球体を高さ 50cm の位置から自由落下させ加速度と接触時間の関係を観測する。重錘の着地時に加速度センサーで捉えた衝撃波の継続時間(接触時間)は地盤が軟らかい(= E が小さい)ほど長く、硬いほど短くなるため、接触時間と加速度の関係は地盤の硬軟を表す変形係数(E)と密接に関係しているものと考えられる。加速度と接触時間との関係は概念的に図-2 に示すような関係で表現される。落球探査試験では、Hertz (ヘルツ) が提案した弾性球体の接触理論¹⁾に基づき、重錘の着地を半径無限大の球体とみなされる地球(地盤)と、もう一つの球体である重錘との接触事象ととらえると、その挙動から地盤の変形係数 E を推定することが出来、経験的な相関式を用いるのではなく式(1)に示す Hertz 理論式に接触時間を代入して E を算出が可能となる。

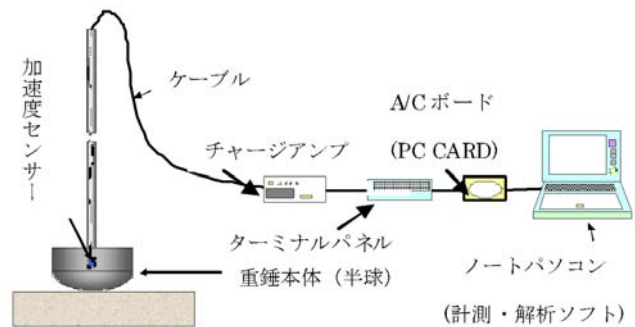
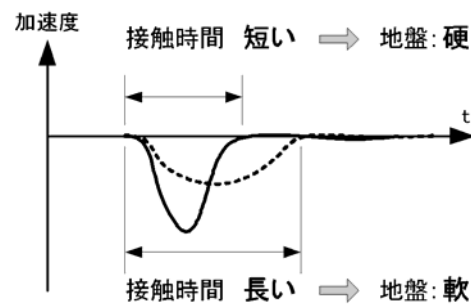
$$T = a \left[\frac{m \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)}{\sqrt{rV_0}} \right]^{0.4} \quad (1)$$

ここで m : 落球の重さ、 r : 半径、 E_1 、 E_2 : 落球と地盤の変形係数、 ν_1 、 ν_2 : 落球と地盤のポアソン比、 V_0 : 着地速度 = $(2gH)^{0.5}$ 、 g : 重力加速度、 H : 落下高さ、

a : 定数(≒4.53)を示す。ただし、上式は理想弾性体を対象としたものであり、地盤に適用する際は探査結果をもとに上式による推定値を補正する必要がある。ここでは、既往研究²⁾による補正方法を適用した。

3. 土層実験

3.1 土層規模 半無限弾性地盤の応力分布はブジネスクにより理論的に求められている。ただし、ブジネスク解は集中荷重を想定していることから均等な円荷重が作用した場合の応力解³⁾については、その荷重範囲で積分し(2)式として与えられる。

図-1 落球探査の機器構成²⁾図-2 加速度と接触時間の関係²⁾

$$\frac{\sigma_z}{p_0} = 1 - \frac{1}{\left\{1 + \left(\frac{B}{2z}\right)^2\right\}^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

ここに、 B ：基礎幅、 σ_z ：荷重中心軸上の鉛直応力、 p_0 ：等分布荷重、 z ：鉛直深度である。ここで、土層規模を設定するにあたり、基礎幅 B に相当する載荷幅を、落球探査試験において生じる落球の載荷痕から $B=10\text{cm}$ を想定すると、(2)式において $0.1 p_0$ および $0.05 p_0$ になる z はそれぞれ $1.5B$ (15 cm)、 $2.0B$ (20 cm) 程度と試算される。基礎の設計において応力の伝播状況伝達範囲として $0.1 p_0$ 程度の範囲を対象としていることを考慮すると、土層の深さは $z=20\text{ cm}$ 程度あればよいことになる。また、側方の拘束効果についても同程度の範囲を考えればよいものと思われるが、球体の直径 20 cm を考慮して直径 30 cm と 50 cm のモールドを使用することとした。

3.2 試験試料 試験に用いた材料の物理・力学特性を総括して表-1に示す。試料の土性は日本統一分類の細粒分質砂質礫 (GFS) に属し、自然含水比 $W_f=30.8\%$ で $\text{JIS}\times 1\text{Ec}$ の突固めエネルギーで得られる締固め密度となるように試料調整を行い同一粒度で三軸試験と落球探査試験を行った。三軸圧縮試験は非圧密非排水条件(UU)にて、 $\text{JGS } 0521$ に準じ、供試体寸法 $\phi 15\text{cm}\times H30\text{ cm}$ で実施した。応力～ひずみ曲線から求めた変形係数 E_{50} と側圧の関係は図-3に示すとおりであり、 $\sigma_3=50\sim 150\text{ kPa}$ における E_{50} は、 $20\sim 40\text{ MPa}$ の範囲にある。

3.3 落球探査試験結果 試験土層は、1層 5 cm として所定の密度になるようにランマーで均一に締め固めを行い、土層厚 5 cm (1層)、 10 cm (2層)、 15 cm (3層)、 20 cm (4層) の4つの土層を作製し落球探査試験を行った。図-4は、土層厚 (層数) に対して得られた変形係数の関係を示したものである。土層モールドの径に関わらず層厚が増すにしたがって変形係数は低下する傾向にあり、 $z=5\text{ cm}$ で得られた変形係数は試験土層直下の鉄板とコンクリートに伝播した載荷荷重の影響が表れて変形係数が大きくなっているものと考えられる。また、3層目から4層目にかけて、すなわち載荷面から $15\sim 20\text{ cm}$ の深度において数値は収束し、三軸圧縮試験の E_{50} とほぼ一致していることから、深さ $15\sim 20\text{ cm}$ が落球探査における土層内の応力伝播域での値であるものと考えられる。なお、 $z=20\text{ cm}$ における落球探査試験において生じた落球の載荷痕は 9.0 cm 程度であり、3.1項で示したビジネス解による応力伝播域とも整合性のとれた結果となっている。これについては別報⁴⁾にて若干考察を加えた。

4. まとめ

半無限地盤を想定した原地盤での探査試験を室内試験で再現するためには、 $\phi 30\text{ cm}$ 、 $z=20\text{ cm}$ 程度の土層を使用すればよいと考えられ、この規模で行った落球探査試験で得られる変形係数 E と三軸試験 E_{50} はほぼ一致した値が得られた。また、災害廃棄物由来の分別土砂など材料物性が未解明な材料においては、両者 (E と E_{50}) の整合性をはかりながら設計資料として整理していく必要があると考えている。

参考文献

- 1) Goldsmith W.,: Impact, the Theory and Physical Behavior of Colliding Solid, Richard Clay and Company, Ltd., pp.83-91, 1960
- 2) 吉田輝、北本幸義、川野健一、池尻健：落球探査による諸特性の評価、第45回地盤工学研究発表会, pp.113-114, 2011
- 3) 日下部治：土質力学、コロナ社、pp.133-134、2004
- 4) 中村吉男、小島淳一、小澤一喜、藤崎勝利、池尻健：落球探査試験における締固め土の応力伝播特性について (その2：: 解析的検討)、第53回地盤工学研究発表会, 2018 (投稿中)

表-1 試験試料の物理・力学特性

分類名	細粒分質砂質礫
分類記号	GFS
土粒子密度 (Mg/m^3)	2.867
最大粒径 (mm)	37.5
礫分 (%)	50.7
砂分 (%)	27.8
シルト分 (%)	11.7
粘土分 (%)	9.8
W_L (%)	63.1
W_P (%)	39.1
I_p	24
ρ_{dmax} (Mg/m^3)	1.464
W_{opt} (%)	29.2
C_u (kPa)	60.7
ϕ_u (°)	32.4

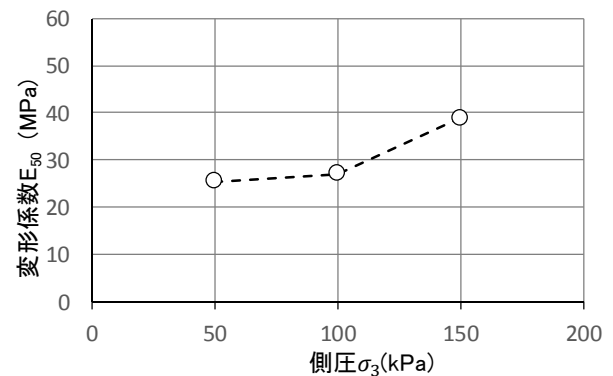


図-3 側圧と E_{50} の関係

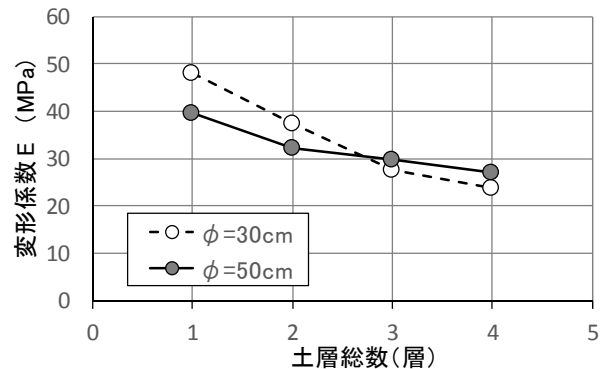


図-4 土層厚と E の関係